

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Ильшат Ринатович Мухаметзянов

Должность: директор

Дата подписания: 14.07.2023 09:36:08

Уникальный идентификатор документа: aba80b84033c9ef196388e9ea0434f90a83a40954ba270e84bcb664f02d1d8d0

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Казанский национальный исследовательский**

**технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ»
(КНИТУ-КАИ)**

Чистопольский филиал «Восток»

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ
по дисциплине
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА**

Индекс по учебному плану: **Б1.В.04.01**

Направление подготовки: **09.03.01 Информатика и вычислительная техника**

Квалификация: **Бакалавр**

Профиль подготовки: **Автоматизированные системы обработки информации
и управления**

Типы задач профессиональной деятельности: **проектная, производственно-
технологическая**

Рекомендовано УМК ЧФ КНИТУ-КАИ

Чистополь
2023 г.

№ п/п	№ темы	Наименование лабораторных работ	Трудоемкость (час.)
1.	1	Расчет разветвленной линейной электрической цепи постоянного тока с несколькими источниками электрической энергии	2
2.	1	Расчет разветвленной линейной электрической цепи постоянного тока с несколькими источниками электрической энергии методом узловых потенциалов	2
3.	1	Метод эквивалентного генератора напряжений	2
4.	2	Расчет линейной электрической цепи однофазного синусоидального тока	2
5.	3	Расчет трехфазной цепи с несимметричной нагрузкой (треугольник)	2
6.	3	Расчет трехфазной цепи с несимметричной нагрузкой (звезда)	2
7.	3, 4	Расчет переходных процессов в линейных цепях при постоянной ЭДС источника	2
8.	3, 6	Расчет трехфазного выпрямителя	2
9.	5	Расчет характеристик трехфазного трансформатора	2

1. Расчет разветвленной линейной электрической цепи постоянного тока с несколькими источниками электрической энергии

Для электрической цепи рис. 1, выполнить следующее:

1. Составить уравнения для определения токов путем непосредственного применения [законов Кирхгофа](#). Решать эту систему уравнений не следует.
2. Определить токи в ветвях методом контурных токов.
3. Построить [потенциальную диаграмму](#) для любого замкнутого контура, содержащего обе ЭДС.
4. Определить режимы работы активных элементов и составить баланс мощностей.

Значения ЭДС источников и сопротивлений приемников:
 $E_1 = 130 \text{ В}$, $E_2 = 110 \text{ В}$, $R_1 = 4 \text{ Ом}$, $R_2 = 8 \text{ Ом}$, $R_3 = 21 \text{ Ом}$, $R_4 = 16 \text{ Ом}$, $R_5 = 19 \text{ Ом}$, $R_6 = 16 \text{ Ом}$.

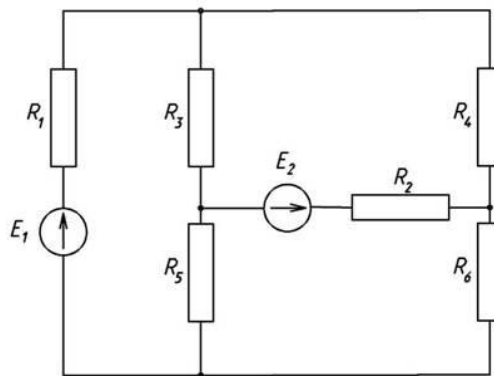
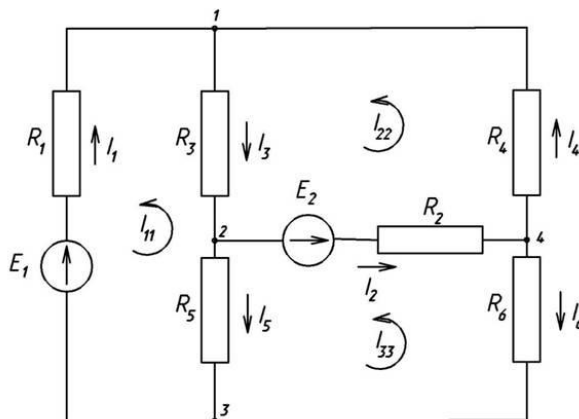


Рис. 1. Схема

Решение.

1. Произвольно расставим направления токов в ветвях цепи, примем направления обхода контуров (против часовой стрелки), обозначим узлы.



2. Для получения системы уравнений по законам Кирхгофа для расчета токов в ветвях цепи составим по 1-му закону Кирхгофа 3 уравнения (на 1 меньше числа узлов в цепи) для узлов 1,2,3:

$$I_1 + I_4 - I_3 = 0$$

$$I_3 - I_2 - I_5 = 0$$

$$I_5 + I_6 - I_1 = 0$$

По второму закону Кирхгофа составим $m - (p - 1)$ уравнений (где m – кол-во ветвей, p – кол-во узлов), т.е. $6 - (4 - 1) = 3$ для контуров I11, I22, I33:

$$-E_1 = -I_1 R_1 - I_5 R_5 - I_3 R_3$$

$$E_2 = I_2 R_2 + I_4 R_4 + I_3 R_3$$

$$-E_2 = -I_2 R_2 + I_5 R_5 - I_6 R_6$$

Токи и напряжения совпадающие с принятым направлением обхода с «+», несовпадающие с «-». Т.е. полная система уравнений для нашей цепи, составленная по законам Кирхгофа:

$$I_1 + I_4 - I_3 = 0$$

$$I_3 - I_2 - I_5 = 0$$

$$I_5 + I_6 - I_1 = 0$$

$$-E_1 = -I_1 R_1 - I_5 R_5 - I_3 R_3$$

$$E_2 = I_2 R_2 + I_4 R_4 + I_3 R_3$$

$$-E_2 = -I_2 R_2 + I_5 R_5 - I_6 R_6$$

3. Определим токи в ветвях методом контурных токов. Зададимся направлениями течения контурных токов в каждом контуре схемы и обозначим их I11, I22, I33 (см. рис. 2)

4. Определим собственные сопротивления трех контуров нашей цепи, а так же взаимное сопротивление контуров:

$$R_{11} = R_1 + R_3 + R_5 = 4 + 21 + 19 = 44 \text{ (Ом)}$$

$$R_{12} = R_{21} = -R_3 = -21 \text{ (Ом)}$$

$$R_{22} = R_2 + R_3 + R_4 = 8 + 21 + 16 = 45 \text{ (Ом)}$$

$$R_{23} = R_{32} = -R_2 = -8 \text{ (Ом)}$$

$$R_{33} = R_2 + R_5 + R_6 = 8 + 19 + 16 = 43 \text{ (Ом)}$$

$$R_{13} = R_{31} = -R_5 = -19 \text{ (Ом)}$$

5. Составим систему уравнений для двух контуров нашей цепи:

$$R_{11} \cdot I_{11} + R_{12} I_{22} + R_{13} I_{33} = -E_1$$

$$R_{21} I_{11} + R_{22} I_{22} + R_{23} I_{33} = E_2$$

$$R_{31} I_{11} + R_{32} I_{22} + R_{33} I_{33} = -E_2$$

Подставим числовые значения и решим.

$$44 \cdot I_{11} - 21 \cdot I_{22} - 19 I_{33} = -130$$

$$-21 I_{11} + 45 I_{22} - 8 I_{33} = 110$$

$$-19 I_{11} - 8 I_{22} + 43 I_{33} = -110$$

$$I_{11} = -5,88 \text{ (А)}$$

$$I_{22} = -1,26 \text{ (А)}$$

$$I_{33} = -5,39 \text{ (А)}$$

Определим фактические токи в ветвях цепи:

$$I_1 = -I_{11} = 5,88 \text{ (А)} \text{ направление совпадает с выбранным}$$

$$I_2 = I_{22} - I_{33} = -1,26 - (-5,39) = 4,13 \text{ (А)} \text{ направление совпадает с выбранным}$$

$$I_3 = I_{22} - I_{11} = -1,26 - (-5,88) = 4,62 \text{ (А)} \text{ направление совпадает с выбранным}$$

$$I_4 = I_{22} = -1,26 \text{ (А)} \text{ направление тока противоположно выбранному}$$

$$I_5 = I_{33} - I_{11} = -5,39 - (-5,88) = 0,49 \text{ (А)} \text{ направление совпадает с выбранным}$$

$$I_6 = -I_{33} = 5,39 \text{ (А)} \text{ направление совпадает с выбранным}$$

6. Проверим баланс мощностей:

$$E_1 I_1 + E_2 I_2 = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 + I_4^2 R_4 + I_5^2 R_5 + I_6^2 R_6$$

$$E_1 I_1 + E_2 I_2 = 5,88 \cdot 130 + 4,132 \cdot 110 = 1219 \text{ (ВА)}$$

$$I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 + I_4^2 R_4 + I_5^2 R_5 + I_6^2 R_6 =$$

$$= 5,88^2 \cdot 4 + 4,13^2 \cdot 8 + 4,62^2 \cdot 21 + 1,26^2 \cdot 16 + 0,49^2 \cdot 19 + 5,39^2 \cdot 16 = 1218,8 \text{ (ВА)}$$

Небольшая разница в полученных результатах является результатом погрешности при округлении числовых значений токов и сопротивлений.

7. Построим потенциальную диаграмму контура изображенного на рис. 3. В качестве начальной точки примем узел 1.

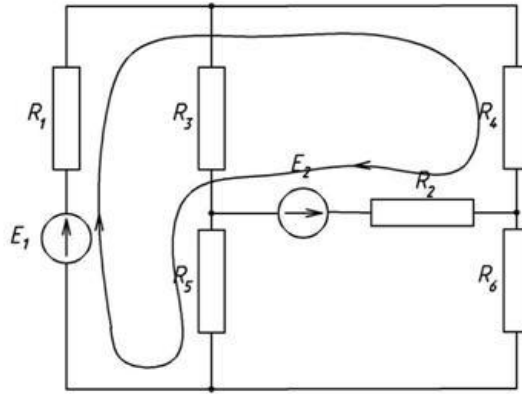


Рис.3

Для построения потенциальной диаграммы определим падения напряжения на каждом сопротивлении, входящем в выбранный контур.

$$U_4 = R_4 I_4 = 16 \cdot 1,26 = 20,2 \text{ (В)}$$

$$U_2 = R_2 I_2 = 8 \cdot 4,13 = 33 \text{ (В)}$$

$$U_5 = R_5 I_5 = 19 \cdot 0,49 = 9,3 \text{ (В)}$$

$$U_1 = R_1 I_1 = 4 \cdot 5,88 = 23,5 \text{ (В)}$$

Потенциал увеличивается если обход осуществляется против направления тока, и понижается если направление обхода совпадает с направлением тока. На участке с ЭДС потенциал изменяется на величину ЭДС. Потенциал повышается в том случае, когда переход от одной точки к другой осуществляется по направлению ЭДС и понижается когда переход осуществляется против направления ЭДС.

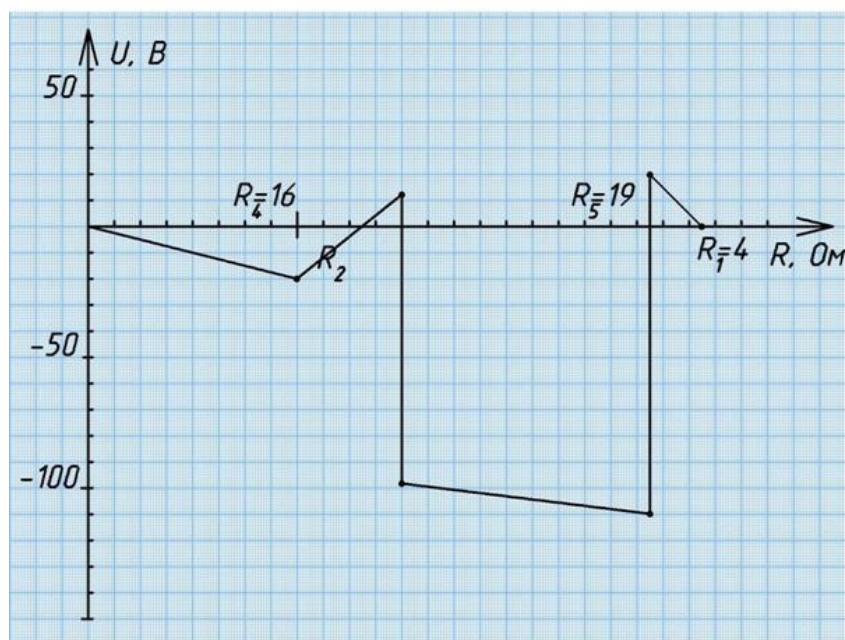


Рис. 4. Потенциальная диаграмма.

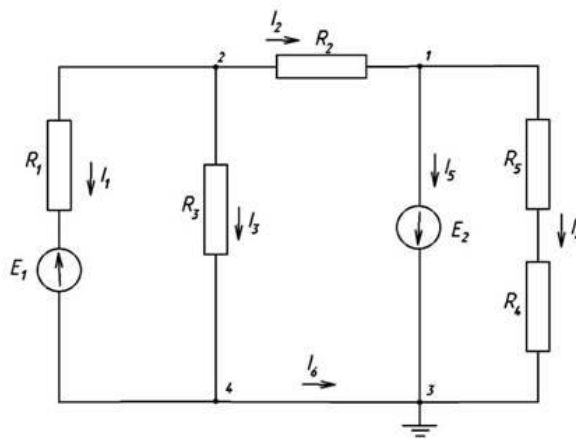
2. Расчет разветвленной линейной электрической цепи постоянного тока с несколькими источниками электрической энергии методом узловых потенциалов

Рассчитать токи в ветвях схемы методом узловых напряжений. Проверку решения задачи осуществить по 1-му правилу Кирхгофа для узлов.

Исходные данные для расчета: $E_1 = 1 \text{ В}$, $E_2 = 1 \text{ В}$, $R_1 = 1 \text{ Ом}$, $R_2 = 1 \text{ Ом}$, $R_3 = 2 \text{ Ом}$, $R_4 = 5 \text{ Ом}$, $R_5 = 4 \text{ Ом}$

Решение

1. Пронумеруем узлы, потенциал в узле 3 приравняем к 0 (следовательно и потенциал в узле 4 будет равен 0) расставим токи в ветвях (от предполагаемого узла с большим потенциалом к меньшему).



2. Поскольку потенциалы в узлах 3 и 4 известны – равны 0, согласно метода узловых напряжений составим два уравнения для узлов 1 и 2, однако в ветви между узлами 1 и 3 стоит идеальный источник ЭДС без внутреннего сопротивления, следовательно потенциал в узле 1 $\varphi_1 = -E = -1 \text{ В}$. Тогда достаточно одного уравнения для узла 2

$$\varphi_1 G_{21} + \varphi_2 G_{22} = J_2$$

где

$$G_{22} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{1} + \frac{1}{1} + \frac{1}{2} = 2,5 \quad (\text{См})$$

$$G_{21} = -\frac{1}{R_2} = -\frac{1}{1} = -1 \quad (\text{См})$$

$$J_2 = E_1 / R_1 = 1/1 = 1 \quad (\text{А})$$

Подставим численные значения и определим потенциал в узле 2:

$$\varphi_2 = \frac{J_2 - \varphi_1 G_{21}}{G_{22}} = \frac{1 \cdot 1 - (-1) \cdot (-1)}{2,5} = 0 \quad (\text{В})$$

Зная потенциалы всех узлов определим токи в ветвях:

$$I_1 = \frac{-E_1 + (\varphi_2 - \varphi_4)}{R_1} = \frac{-1}{1} = -1 \quad (\text{А}) \text{ направление тока не совпадает с выбранным}$$

$$I_2 = \frac{(\varphi_2 - \varphi_4)}{R_2} = \frac{1}{1} = 1 \quad (\text{А}) \text{ направление тока совпадает с выбранным}$$

$$I_3 = \frac{(\varphi_2 - \varphi_4)}{R_3} = \frac{0}{R_3} = 0 \quad (\text{А})$$

$$I_1 = \frac{-E_1 + (\varphi_2 - \varphi_4)}{R_1} = \frac{-1}{1} = -1 \quad (\text{А}) \text{ направление тока не совпадает с выбранным}$$

$$I_4 = \frac{(\varphi_1 - \varphi_3)}{R_4} = \frac{-1}{5+4} = -0,11 \quad (\text{А}) \text{ направление тока не совпадает с выбранным}$$

$$I_5 = I_2 - I_4 = 1 - (-0,11) = 1,11 \quad (\text{А}) \text{ направление тока совпадает с выбранным}$$

$$I_6 = -I_5 - I_4 = -1,11 - (-0,11) = -1 \quad (\text{А}) \text{ направление тока не совпадает с выбранным}$$

3. Проверим результат решения по 1-му правилу Кирхгофа для узлов.

$$\text{Для узла 1: } I_2 - I_5 - I_4 = 1 - 1,11 - (-0,11) = 0$$

$$\text{Для узла 2: } -I_1 - I_3 - I_2 = 1 - 0 - 1 = 0$$

$$\text{Для узла 3: } I_6 + I_5 + I_4 = -1 + 1,11 - 0,11 = 0$$

$$\text{Для узла 4: } I_1 + I_3 - I_6 = -1 + 0 - (-1) = 0$$

1-й закон Кирхгофа для всех узлов выполняется – решение правильное.

Метод эквивалентного генератора токов

Пример расчета

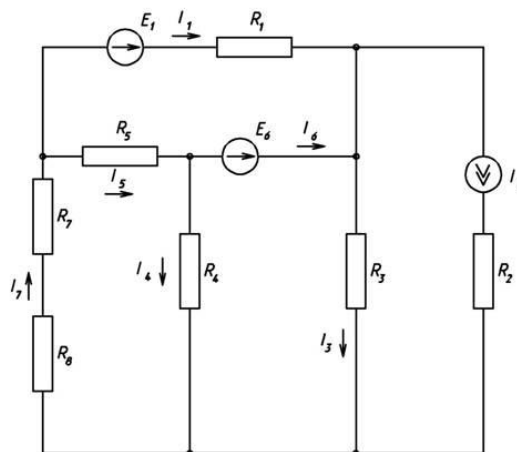


Рис. 1

Исходные данные:

Дано:

$R_1 = 6 \text{ Ом}$, $R_2 = 5 \text{ Ом}$, $R_3 = 4 \text{ Ом}$, $R_4 = 2 \text{ Ом}$, $R_5 = 10 \text{ Ом}$, $R_7 = 3 \text{ Ом}$, $R_8 = 1 \text{ Ом}$,
 $E_1 = 18 \text{ В}$, $E_6 = 12 \text{ В}$, $J_2 = 1 \text{ А}$

Методом эквивалентного генератора токов определить ток в ветви содержащей сопротивление R_4

Решение

Методом эквивалентного генератора токов (I) определим ток I_4

1. Замкнем узлы 1 и 2, определим ток к.з. $I_{кз1}$ при $E_1 \neq 0$

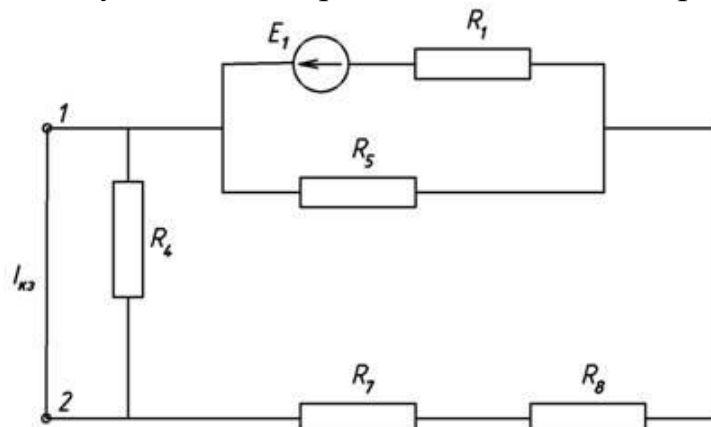


Рис. 2.

$$I_0 = \frac{-E_1}{R_1 + \frac{R_5 \cdot (R_7 + R_8)}{R_5 + R_7 + R_8}} = \frac{-18}{6 + \frac{10 \cdot 4}{10 + 4}} = -2,03 \text{ (А)}$$

$$I_{кз1} = I_0 \frac{R_5}{R_5 + R_7 + R_8} = -2,03 \frac{10}{10 + 4} = -1,45 \text{ (А)}$$

2. Замкнем узлы 1 и 2, определим ток к.з. $I_{кз2}$ при $E_6 \neq 0$

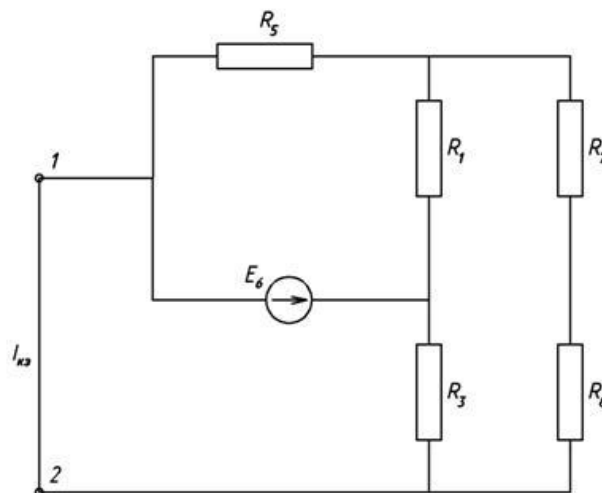


Рис. 3

Выполнив расчет схемы (рис. 3) [методом контурных токов](#) получим

$$I_{kz2} = 3,968(A)$$

3. Замкнем узлы 1 и 2, определим ток к.з. I_{kz3} при $J \neq 0$

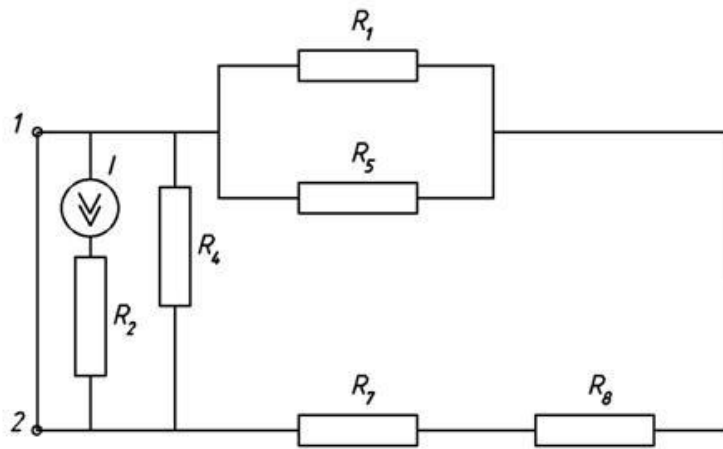


Рис. 4.

$$I_1 = \frac{-E_1 + (\varphi_2 - \varphi_1)}{R_1} = \frac{-1}{1} = -1$$

4. Заменяем исходную схему эквивалентным генератором тока

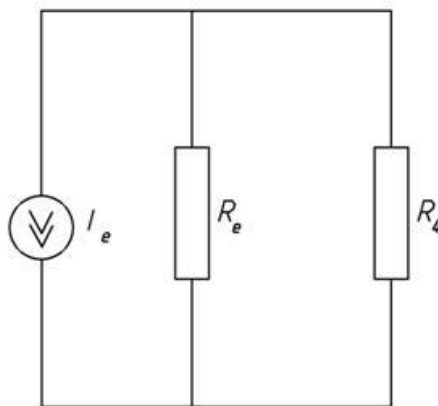


Рис. 5.

$$I_e = I_{kz1} + I_{kz2} + I_{kz3} = -1,45 + 3,968 + 1 = 3,518(A)$$

$$I_4 = \frac{I_e \cdot R_e}{R_e + R_4} = \frac{3,518 \cdot 2,64}{2,64 + 2} = 2(A)$$

Ответ: $I_4 = 2 A$

3. Метод эквивалентного генератора напряжений

Пример расчета

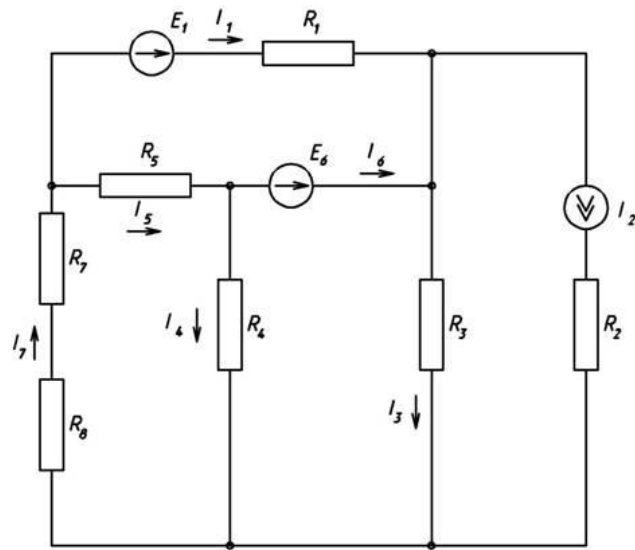


Рис. 1

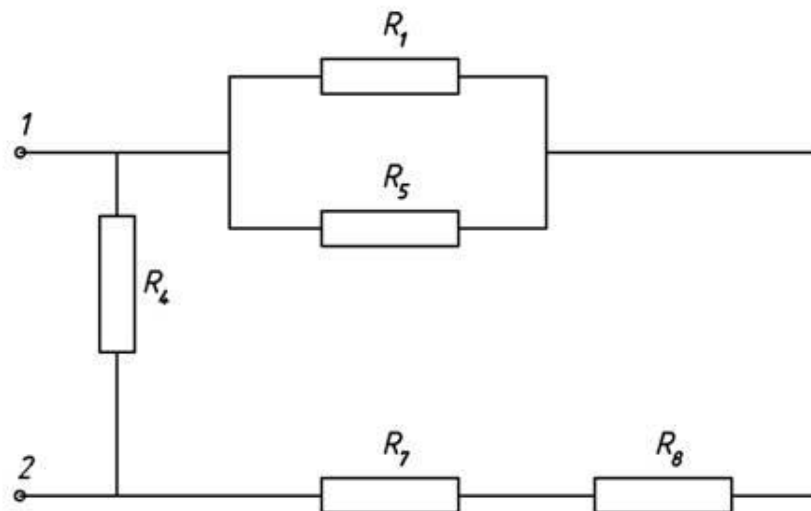


Рис. 2.

$$R_{1-5} = \frac{R_1 \cdot R_5}{R_1 + R_5} = \frac{6 \cdot 10}{6 + 10} = 3,75 (\text{Ом})$$

$$R_6 = \frac{R_3 \cdot (R_{1-5} + R_7 + R_8)}{R_3 + R_{1-5} + R_7 + R_8} = \frac{4 \cdot (3,75 + 3 + 1)}{4 + 3,75 + 3 + 1} = 2,64 (\text{Ом})$$

2. Определим \$U_{хх1}\$ при \$E_1 \neq 0\$

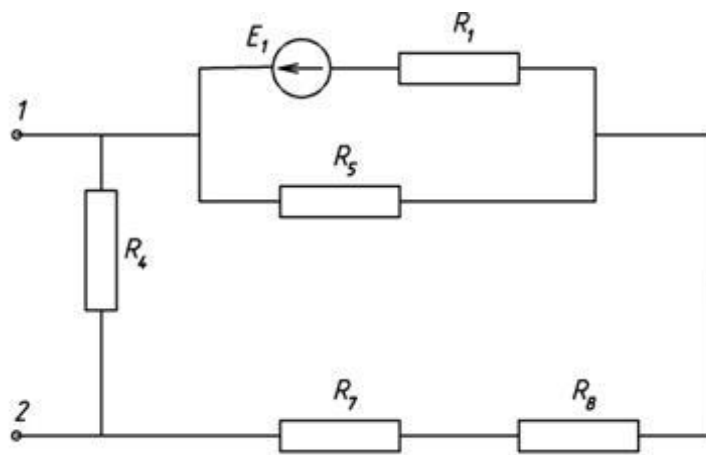


Рис. 3

$$R_{\text{вх1}} = R_1 + \frac{R_5 \cdot (R_3 + R_7 + R_8)}{R_5 + R_3 + R_7 + R_8} = 6 + \frac{10 \cdot 8}{10 + 8} = 10,44(\text{Ом})$$

$$U_{\text{хх1}} = \frac{-E_1}{R_{\text{вх1}}} \cdot \frac{R_5}{R_5 + R_3 + R_7 + R_8} \cdot R_3 = \frac{-18}{10,44} \cdot \frac{10}{10 + 8} \cdot 4 = -3,83(\text{В})$$

3. Определим $U_{\text{хх2}}$ при $E_6 \neq 0$

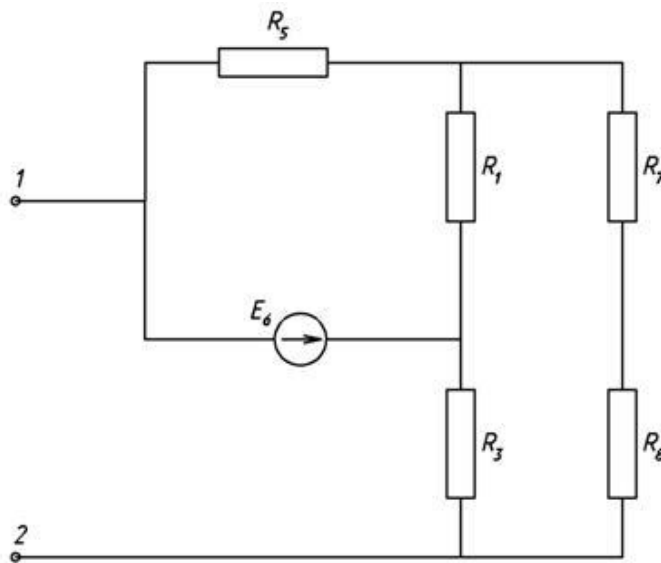


Рис. 4.

$$I_0 = \frac{E_6}{R_5 + \frac{R_1 \cdot (R_3 + R_7 + R_8)}{R_1 + R_3 + R_7 + R_8}} = \frac{12}{10 + \frac{6 \cdot 8}{6 + 8}} = 0,89(\text{А})$$

$$U_{\text{хх2}} = E_6 - I_0 \frac{R_1}{R_1 + R_3 + R_7 + R_8} \cdot R_3 = 12 - 0,89 \cdot \frac{6}{6 + 8} \cdot 4 = 10,5(\text{В})$$

4. Определим U_{xx3} при $J \neq 0$

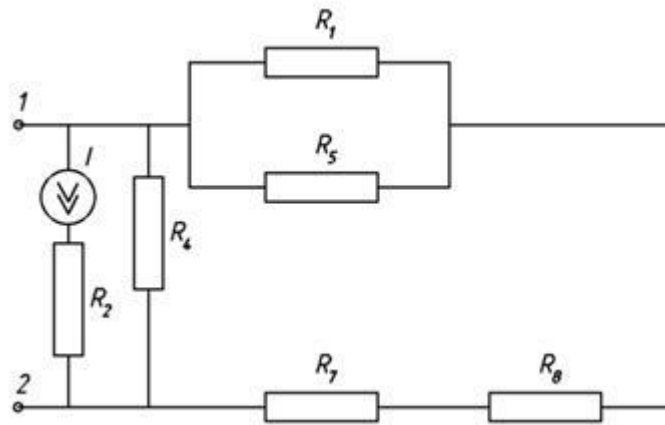


Рис. 5.

$$U_{xx3} = J \cdot R_8 = 1 \cdot 2,64 = 2,64 \text{ (В)}$$

5. Тогда $E_e = U_{xx1} + U_{xx2} + U_{xx3} = -3,83 + 10,5 + 2,64 = 9,31 \text{ (В)}$.

Согласно [метода экв. генератора](#)

$$I_4 = \frac{E_e}{R_8 + R_4} = \frac{9,31}{2,64 + 2} = 2 \text{ (А)}$$

Ответ: $I_4 = 2 \text{ А}$

4. Расчет линейной электрической цепи однофазного синусоидального тока

Для цепи, изображенной на рис. 1 требуется:

1. Определить комплексным методом действующие значения напряжений и токов на всех участках цепи.
2. Определить активные, реактивные и полные мощности каждого участка цепи и всей цепи.
3. Составить баланс активных и реактивных мощностей и оценить погрешность расчета.
4. Построить векторную диаграмму токов и напряжений.

Частота питающего напряжения 50 Гц.

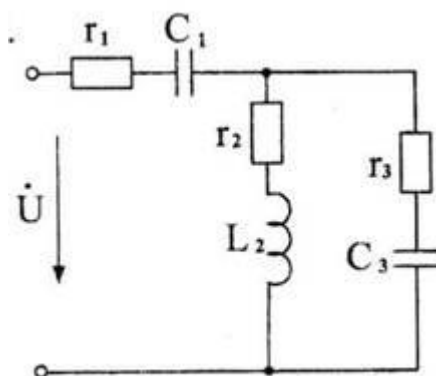


Рис. 1

Исходные данные:

$U = 127 \text{ В}$, $r_1 = 15 \text{ Ом}$, $C_1 = 60 \text{ мкФ}$, $r_2 = 10 \text{ Ом}$, $L_2 = 80 \text{ мГн}$, $r_3 = 15 \text{ Ом}$, $C_3 = 90 \text{ мкФ}$.

Решение.

1. Определим комплексные сопротивления каждой ветви.

$$\underline{Z}_1 = r_1 - jX_{C_1} = r_1 - j \frac{1}{\omega C_1} = r_1 - j \frac{1}{2\pi f C_1} = 15 - j \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 60 \cdot 10^{-6}} = 15 - j53,1 = 55,2 e^{-j74,22}$$

(Ом)

$$\underline{Z}_2 = r_2 + jX_{L_2} = r_2 + j\omega L_2 = 10 + j314 \cdot 80 \cdot 10^{-3} = 10 + j25,12 = 27,04 e^{j68,3} \quad (\text{Ом})$$

$$\underline{Z}_3 = r_3 - jX_{C_3} = r_3 - j \frac{1}{\omega C_3} = 15 - j \frac{1}{314 \cdot 90 \cdot 10^{-6}} = 15 - j35,4 = 38,45 e^{-j67,04}$$

)

2. Определим полное сопротивление цепи.

$$\underline{Z} = \underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = 15 - j53,1 + \frac{27,04 e^{j68,3} \cdot 38,45 e^{-j67,04}}{10 + j25,12 + 15 - j35,4} = 50,24 - j37,7 = 62,8 e^{-j36,88} \quad (\text{Ом})$$

3. Приняв $\dot{U} = U$ найдем токи и напряжения в ветвях.

$$\dot{I}_1 = \frac{U}{\underline{Z}} = \frac{127}{62,8 e^{-j36,88}} = 2,02 e^{j36,88} \quad (\text{А})$$

$$\dot{U}_{\omega} = \dot{I}_1 \cdot \frac{\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = 2,02 e^{j36,88} \cdot 38,46 e^{j23,6} = 77,7 e^{j60,48} \quad (\text{В})$$

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 \cdot \dot{Z}_1 = 2,02 e^{j36,88} \cdot 55,2 e^{-j74,22} = 111,5 e^{-j37,34} \quad (\text{B})$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_{ab}}{\underline{Z}_2} = \frac{77,7 e^{j60,48}}{27,04 e^{j68,3}} = 2,87 e^{-j7,82} \quad (\text{A})$$

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_{ab}}{\underline{Z}_3} = \frac{77,7 e^{j60,48}}{38,45 e^{-j67,04}} = 2,02 e^{j127,52} \quad (\text{A})$$

4. Определим активные, реактивные и полные мощности участков цепи и всей цепи целиком.

Мощность первого участка:

$$\dot{S}_1 = \dot{U}_1 \cdot \dot{I}_1 = P_1 + jQ_1 = 111,5 e^{-j37,34} \cdot 2,02 e^{-j36,88} = 225,23 e^{-j74,22} = 61,25 - j216,7 \quad (\text{BA})$$

Мощность второго участка:

$$\dot{S}_2 = \dot{U}_{ab} \cdot \dot{I}_2 = P_2 + jQ_2 = 77,7 e^{j60,48} \cdot 2,87 e^{j7,82} = 222,99 e^{j68,3} = 82,44 + j207,19 \quad (\text{BA})$$

Мощность третьего участка:

$$\dot{S}_3 = \dot{U}_{ab} \cdot \dot{I}_3 = P_3 + jQ_3 = 77,7 e^{j60,48} \cdot 2,02 e^{-j127,52} = 156,95 e^{-j67,04} = 61,22 - j144,5 \quad (\text{BA})$$

Полная мощность всей цепи:

$$\dot{S} = \dot{U} \cdot \dot{I}_1 = P + jQ = 127 \cdot 2,02 e^{-j36,88} = 256,54 e^{-j36,88} = 205,2 - j153,96 \quad (\text{BA})$$

Проверим баланс активных мощностей:

$$P = P_1 + P_2 + P_3$$

$$P = 205,2 \quad (\text{BA})$$

$$P_1 + P_2 + P_3 = 61,25 + 82,44 + 61,22 = 204,91 \quad (\text{BT})$$

$$\text{Абс. погр-ть } \Delta = P - (P_1 + P_2 + P_3) = 205,2 - 204,91 = 0,29 \quad (\text{BT})$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{P} = \frac{0,29}{205,2} \cdot 100\% = 0,14\%$$

Отн. погр-ть

Проверим баланс реактивных мощностей:

$$S = S_1 + S_2 + S_3$$

$$S = -153,96 \quad (\text{BA})$$

$$S_1 + S_2 + S_3 = -216,7 + 207,19 - 144,5 = -154,01 \quad (\text{BA})$$

$$\text{Абс. погр-ть } \Delta = |S - (S_1 + S_2 + S_3)| = |153,96 - 154,01| = 0,05 \quad (\text{BA})$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{S} = \frac{0,05}{153,96} \cdot 100\% = 0,03\%$$

Отн. погр-ть

5. Построим векторную диаграмму на комплексной плоскости.

Для этого определим напряжения на каждом элементе схемы.

$$U_{r1} = I_1 \cdot r_1 = 2,02e^{j36,88} \cdot 15 = 30,3e^{j36,88} \quad (\text{В})$$

$$U_{c1} = I_1 X_{c1} = 2,02e^{j36,88} \cdot 53,1e^{-j90} = 107,2e^{-j53,12} \quad (\text{В})$$

$$U_{r2} = I_2 r_2 = 2,78e^{-j7,82} \cdot 10 = 27,8e^{-j7,82} \quad (\text{В})$$

$$U_{L2} = I_2 \cdot X_{L2} = 2,78e^{-j7,82} \cdot 25,12e^{j90} = 69,8e^{j82,18} \quad (\text{В})$$

$$U_{r3} = I_3 r_3 = 2,02e^{j127,52} \cdot 15 = 30,3e^{j127,52} \quad (\text{В})$$

$$U_{c3} = I_3 X_{c3} = 2,02e^{j127,52} \cdot 35,4e^{-j90} = 71,5e^{j37,52} \quad (\text{В})$$

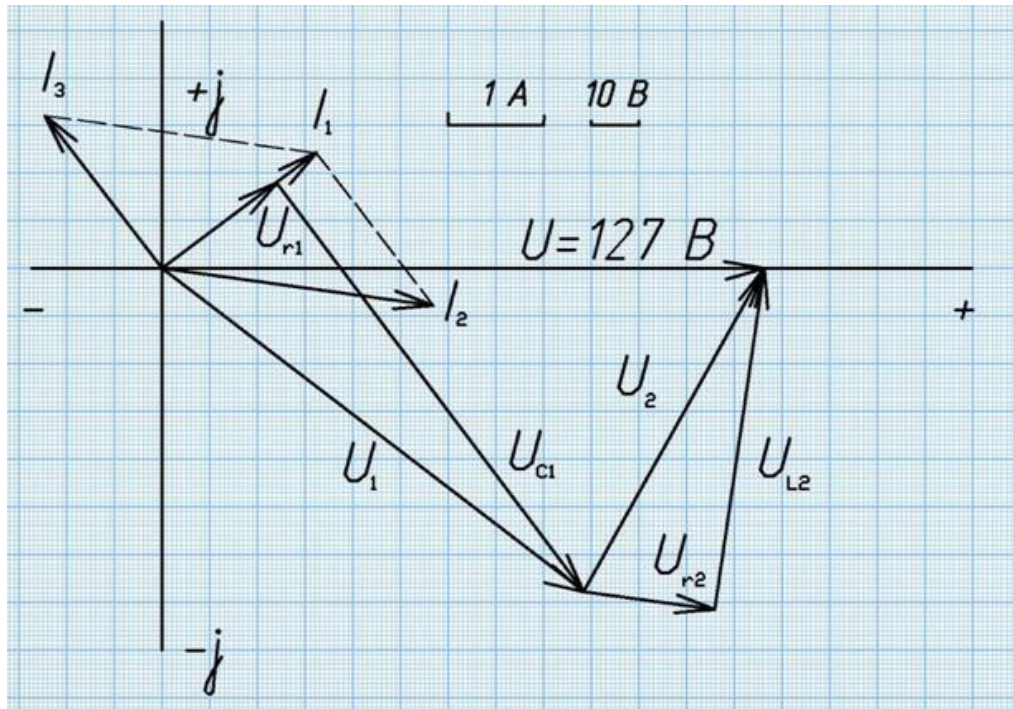


Рис. 2. Векторная диаграмма.

5. Расчет трехфазной цепи с несимметричной нагрузкой (треугольник)

К трехфазному источнику подключен несимметричный трехфазный приемник (рис. 1). Значения линейного напряжения, активных, индуктивных и емкостных сопротивлений приемников приведены ниже. Требуется:

1. Определить фазные и линейные токи для заданной схемы соединения, а также ток в нейтральном проводе для схемы «треугольник».
2. Определить активную, реактивную и полную мощности, потребляемые цепью.
3. Построить векторную диаграмму напряжений и токов.

Исходные данные:

$U_L = 220 \text{ В}$, $R_1 = 25 \text{ Ом}$, $X_C = 18 \text{ Ом}$, $X_L = 28 \text{ Ом}$, $R_2 = 30 \text{ Ом}$, $R_3 = 30 \text{ Ом}$

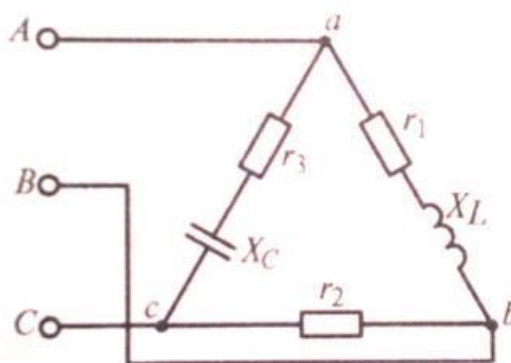


Рис. 1

Решение..

Определим фазные напряжения для данной схемы типа «треугольник»:

$$U_{FA} = U_{FB} = U_{FC} = U_L = 220(\text{В}).$$

$$\dot{U}_{AB} = U_L = 220(\text{В})$$

$$\dot{U}_{BC} = U_L \cdot e^{-j120} = 220 \cdot e^{-j120}(\text{В})$$

$$\dot{U}_{CA} = U_L \cdot e^{j120} = 220 \cdot e^{j120}(\text{В})$$

2. Определим комплексные эквивалентные сопротивления каждой фазы:

$$\underline{Z}_A = r_1 + jx_L = 25 + j28 = 37,5e^{j48,2}(\text{Ом})$$

$$\underline{Z}_B = r_2 = 30(\text{Ом})$$

$$\underline{Z}_C = r_3 - jX_c = 30 - j18 = 35e^{-j31}(\text{Ом})$$

3. Определим фазные токи:

$$\dot{I}_{AB} = \dot{U}_{AB} / \underline{Z}_A = 220 / 37,5e^{j48,2} = 5,87e^{-j48,2}(\text{А})$$

$$\dot{I}_{BC} = \dot{U}_{BC} / \underline{Z}_B = 220e^{-j120} / 30 = 7,33e^{-j120}(\text{А})$$

$$\dot{I}_{CA} = \dot{U}_{CA} / \underline{Z}_C = 220e^{j120} / 35e^{-j31} = 6,3e^{j151}(\text{А})$$

4. Определим комплексы действующих значений линейных токов:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA} = 5,87e^{-j48,2} - 6,3e^{j151} = 3,9 - j4,4 + 5,5 - j3 = 9,4 - j7,4 = 11,9e^{-j38} \quad (\text{А})$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB} = 7,33e^{-j120} - 5,87e^{-j48} = -3,7 - j6,3 - 3,9 + j4,4 = -7,6 - j1,9 = 7,8e^{j14+\pi} \quad (\text{А})$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC} = 6,3e^{j151} - 7,33e^{-j120} = -5,5 + j3 + 3,7 + j6,3 = -1,8 + j9,3 = 9,5e^{-j79+\pi} \quad (\text{А})$$

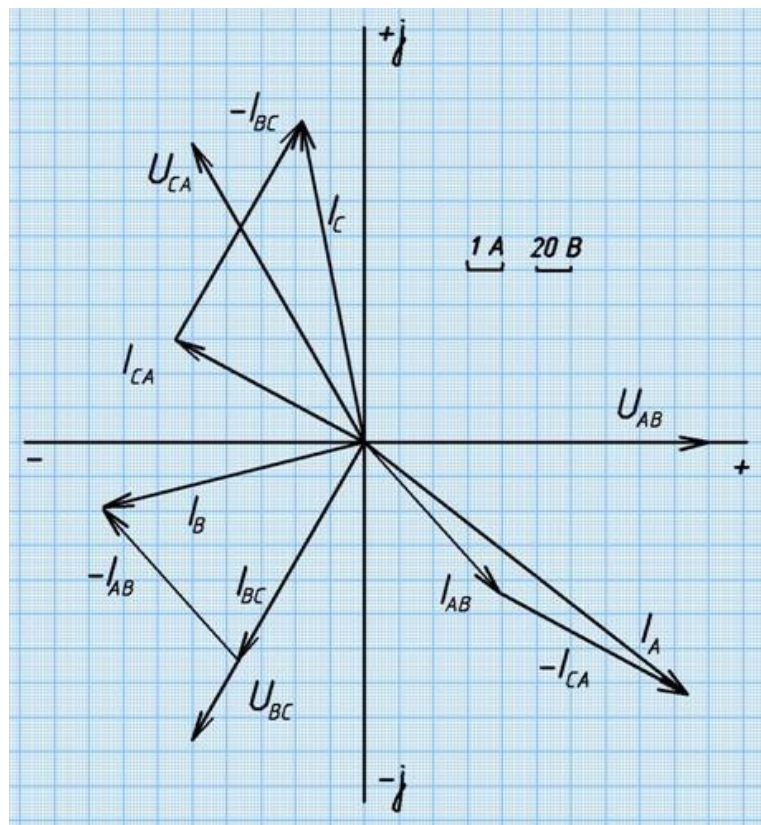
5. Определим активную мощность цепи:

$$P = I_{AB}^2 \cdot R_1 + I_{BC}^2 \cdot R_2 + I_{CA}^2 \cdot R_3 = 5,87^2 \cdot 25 + 7,33^2 \cdot 30 + 6,3^2 \cdot 30 = 3664 \quad (\text{Вт})$$

6. Определим реактивную мощность цепи:

$$Q = I_{AC}^2 \cdot X_C + I_{AB}^2 \cdot X_L = 6,3^2 \cdot 18 + 5,87^2 \cdot 28 = 1679 \quad (\text{вар})$$

7. Построим векторную диаграмму.



6. Расчет трехфазной цепи с несимметричной нагрузкой (звезда)

К трехфазному источнику подключена цепь (рис. 1). Значения линейного напряжения, активных, индуктивных и емкостных сопротивлений приемников приведены ниже.

Требуется:

1. Определить фазные и линейные токи для заданной схемы соединения, а также ток в нейтральном проводе для схемы «звезда».
2. Определить активную и реактивную мощности, потребляемые цепью.
3. Построить векторную диаграмму напряжений и токов.

Исходные данные:

$U_L = 220 \text{ В}$, $X_{C1} = 10 \text{ Ом}$, $R_2 = 9 \text{ Ом}$, $X_{L2} = 13 \text{ Ом}$, $X_{L3} = 8 \text{ Ом}$

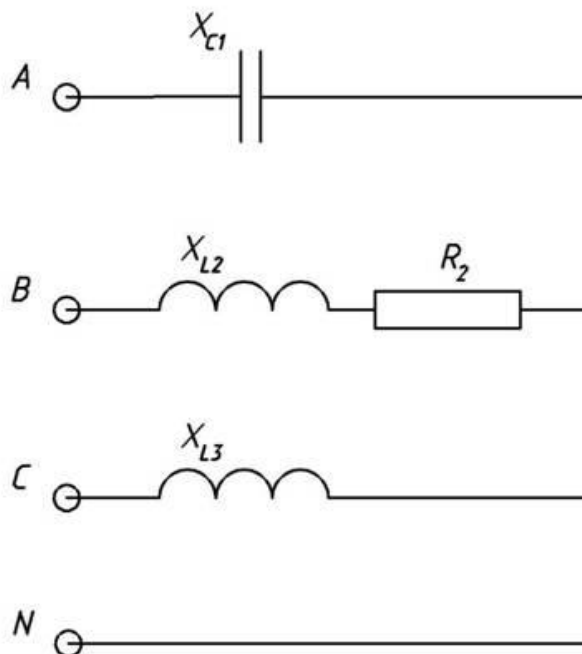


Рис. 1

Решение

1. Определим фазные напряжения для данной схемы типа «звезда»:

$$\dot{U}_A = U_F = 220 / \sqrt{3} = 127 \text{ (В)}$$

$$\dot{U}_B = U_F \cdot e^{-j120} = 127 e^{-j120} \text{ (В)}$$

$$\dot{U}_C = U_F \cdot e^{j120} = 127 \cdot e^{j120} \text{ (В)}$$

2. Определим комплексные эквивалентные сопротивления каждой фазы:

$$\underline{Z}_A = -jx_{C1} = -j10 = 10 e^{-j90} \text{ (Ом)}$$

$$\underline{Z}_B = r_2 + jx_{L2} = 9 + j13 = 15,8 e^{j55,3} \text{ (Ом)}$$

$$\underline{Z}_C = jx_{L3} = j8 = 8 e^{j90} \text{ (Ом)}$$

3. Определим фазные токи (для соединения типа «звезда» фазные токи равны линейным):

$$\dot{I}_A = \frac{U_A}{Z_A} = \frac{127}{10e^{-j90}} = 12,7e^{j90} \quad (\text{A})$$

$$\dot{I}_B = \frac{U_B}{Z_B} = \frac{127e^{-j120}}{15,8e^{j55,3}} = 8e^{-j175,3} \quad (\text{A})$$

$$\dot{I}_C = \frac{U_C}{Z_C} = \frac{127e^{j120}}{8e^{j90}} = 15,9e^{j30} \quad (\text{A})$$

4. Определим комплекс действующего значения тока в нейтральном проводе:

$$\begin{aligned} \dot{I}_N &= \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 12,7e^{j90} + 8e^{-j175,3} + 15,9e^{j30} = \\ &= j12,7 - 7,97 - j0,65 + 13,7 + j7,95 = \\ &= 5,73 + j20 = 20,8e^{j74} \end{aligned}$$

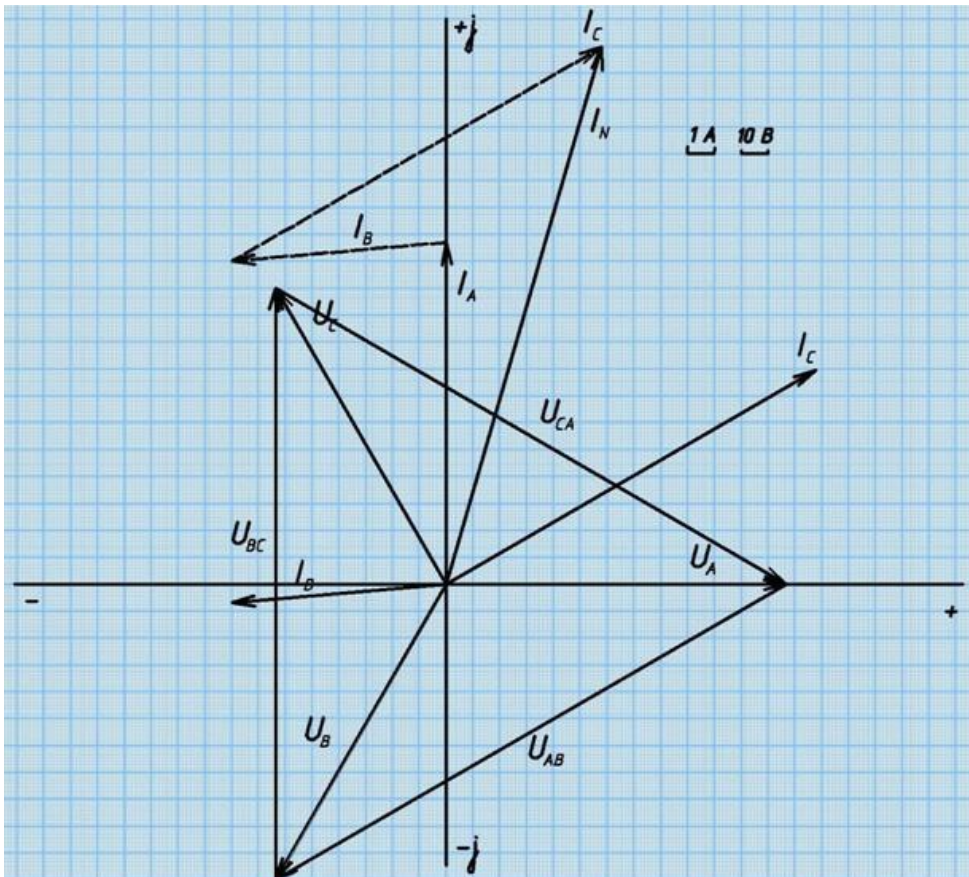
5. Определим активную мощность

$$P = I_B^2 \cdot R_2 = 8^2 \cdot 9 = 576 \text{ (Вт)}$$

6. Определим реактивную мощность.

$$Q = I_A^2 \cdot X_{C1} + I_B^2 \cdot X_{L2} + I_C^2 \cdot X_{L3} = 12,7^2 \cdot 10e^{-j90} + 8^2 \cdot 13e^{j90} + 15,9^2 \cdot 8e^{j90} = 1241,6e^{j90} \text{ (Вар)}$$

7. Построим векторную диаграмму



7. Расчет переходных процессов в линейных цепях при постоянной ЭДС источника

Цепь, изображенная на рис.1, подключается к источнику постоянного напряжения U . Значения напряжения источника, сопротивлений резисторов, величины индуктивностей и емкостей приведены ниже.

Необходимо:

1. Определить значения токов в ветвях и напряжения на индуктивности или емкости до момента коммутации.
2. Определить значения токов в ветвях и напряжения на индуктивности или емкости в первый момент после коммутации.
3. Определить принужденные значения токов в ветвях и напряжения на индуктивности или емкости.
4. Определить постоянную времени цепи.
5. Определить законы изменения во времени токов в ветвях и напряжения построить их графики на емкости и для моментов времени τ , 2τ , 3τ .

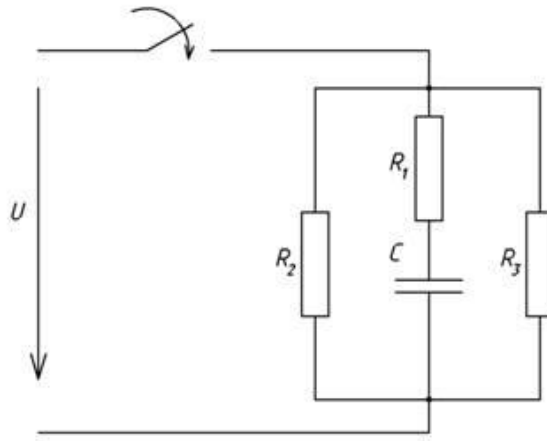


Рис. 1

$U = 80$ (В), $r_1 = 16$ (Ом), $r_2 = 12$ (Ом), $r_3 = 6$ (Ом), $C = 40$ (мкФ).

Решение.

1. До коммутации цепь находилась в состоянии покоя (источник отключен от цепи) и поэтому $u_C(0+) = u_C(0-) = 0$, т.е. имеем нулевые начальные условия.

2. Определим значения токов в ветвях в первый момент после коммутации.

В первый момент времени после коммутации схему можно представить в виде:

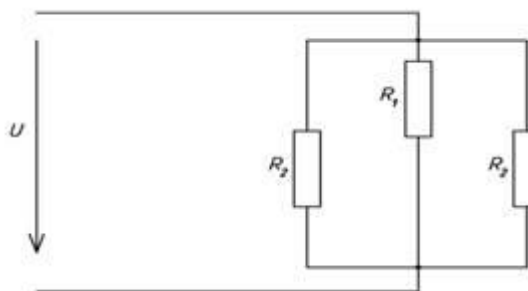


Рис. 2

Ток в неразветвленной части цепи:

$$i_{0(0-)} = \frac{E}{\frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3}} = \frac{80}{3,2} = 25A$$

$$i_{1(0-)} = \frac{E}{R_1} = \frac{80}{16} = 5A$$

$$i_{2(0-)} = \frac{E}{R_2} = \frac{80}{12} = 6,67A$$

$$i_{3(0-)} = \frac{E}{R_3} = \frac{80}{6} = 13,3A$$

3. Определим принужденные значения токов в ветвях и напряжение на емкости (установившийся режим). В установившемся режиме схема примет вид:

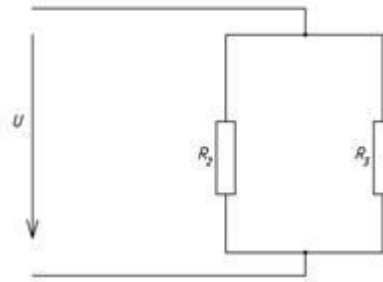


Рис.3

$$i_0 = \frac{E}{\frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}} = \frac{80}{4} = 20A$$

$$i_1 = 0$$

$$i_2 = \frac{E}{R_2} = \frac{80}{12} = 6,66A$$

$$i_3 = \frac{E}{R_3} = \frac{80}{6} = 13,3A$$

4. Определим постоянную времени цепи.

Для этого составим характеристическое уравнение схемы и найдем его корень. Входное сопротивление схемы относительно источника:

$$R_{вх} = \frac{pC \cdot R_1 R_2 R_3 + R_2 R_3}{pC \cdot (R_1 R_3 + R_2 R_3 + R_1 R_2) + R_2 + R_3} = 0$$

$$pC \cdot R_1 R_2 R_3 + R_2 R_3 = 0$$

Корень характеристического уравнения:

$$p = -\frac{R_2 R_3}{C \cdot R_1 R_2 R_3} = -\frac{12 \cdot 6}{40 \cdot 10^{-6} \cdot 16 \cdot 12 \cdot 6} = -1562$$

Постоянная времени цепи:

$$\tau = -\frac{1}{p} = -\frac{1}{-1562} = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ с}$$

5. Определим законы изменения во времени токов в ветвях и напряжения. Выражение для тока в неразветвленной части цепи:

$$i_0(t) = i_{0cb} + i_0;$$

$$i_0(t) = A_0 e^{-1562t} + 20;$$

Определим постоянную интегрирования A_0 и запишем выражения для тока источника:

$$i_0(0) = A_0 + 20 = 25;$$

$$A_0 = 5$$

$$i_0(t) = 5e^{-1526t} + 20;$$

Аналогично определим для остальных ветвей:

$$i_1(0) = A_1 + 0 = 5;$$

$$A_1 = 5$$

$$i_1(t) = 5e^{-1526t};$$

$$i_2(0) = A_2 + 6,66 = 6,66;$$

$$A_2 = 0$$

$$i_2(t) = 6,66;$$

т.е. ток в этой ветке не меняется, равно как и в ветви, содержащей сопротивление R_3

6. Определим напряжение на конденсаторе.

Напряжение в первый момент времени после коммутации (см. Рис. 2):

$$u_{C(0-)} = 0;$$

Напряжение на конденсаторе в установившемся режиме (см. Рис. 3):

$$u_C = 80 \text{ В};$$

Тогда выражение для напряжения:

$$u_C(t) = u_{Ccb} + u_C;$$

$$u_C(t) = A_0 e^{-1562t} + 80;$$

Определим постоянную интегрирования A_0 :

$$u_C(0) = A_0 + 80 = 0;$$

$$A_0 = -80$$

$$u_C(t) = -80e^{-1526t} + 80;$$

7. Построим графики напряжения u_C и тока i_1 для моментов времени τ , 2τ , 3τ

с помощью программы Mathcad.

$$U_C(t) := -80 \cdot \exp(-1562 \cdot t) + 80$$

$$U_{2C}(t) := -80 \cdot \exp(-1562 \cdot 2 \cdot t) + 80$$

$$U_{3C}(t) := -80 \cdot \exp(-1562 \cdot 3 \cdot t) + 80$$

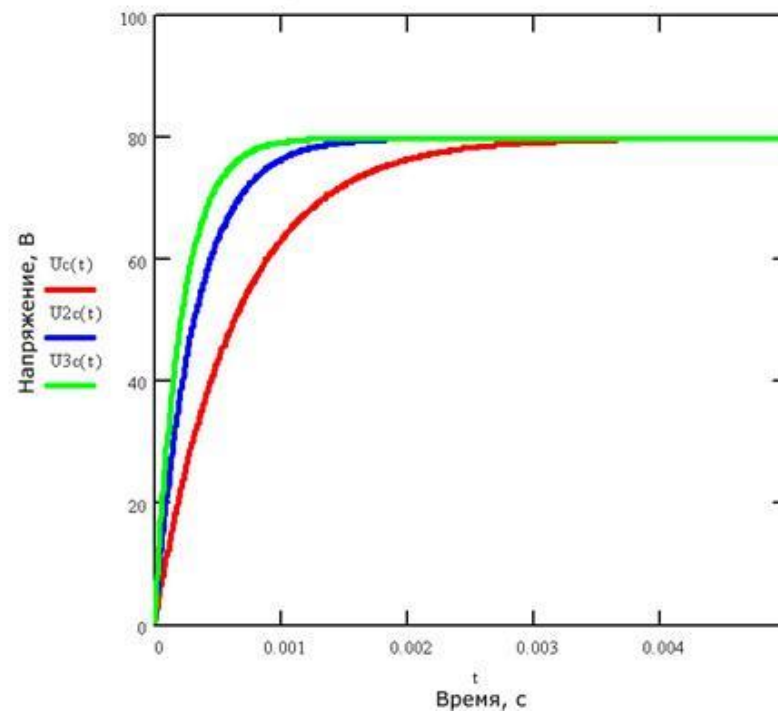


Рис. 4. Графики зависимости $u_C(t)$ при τ , 2τ , 3τ .

$$i_1(t) := 5 \cdot \exp(-1526 \cdot t)$$

$$i_2(t) := 5 \cdot \exp(-1526 \cdot 2 \cdot t)$$

$$i_3(t) := 5 \cdot \exp(-1526 \cdot 3 \cdot t)$$

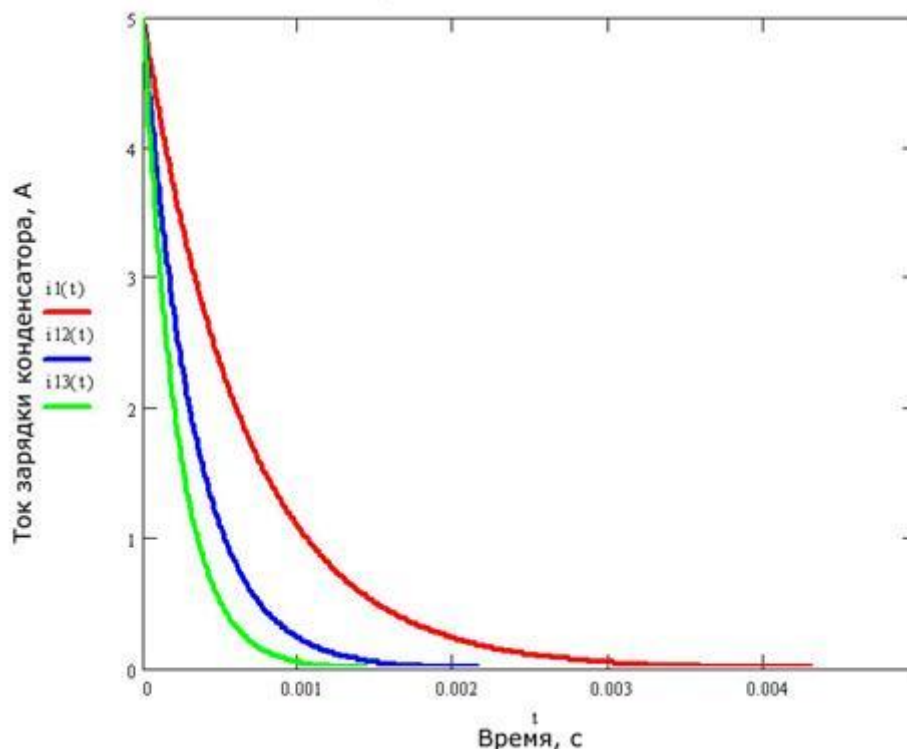


Рис. 5. Графики зависимости тока заряда конденсатора $i_l(t)$ при τ , 2τ , 3τ .

8. Расчет трехфазного выпрямителя

Трехфазный выпрямитель с полупроводниковыми диодами, включенными по простой трехфазной схеме с нейтральным выводом, питает энергией постоянного тока потребитель, имеющий сопротивление R_n .

Известны постоянная составляющая (среднее значение) напряжения на нагрузке $U_{но}$, постоянная составляющая тока в сопротивлении нагрузки $I_{но}$ и линейное напряжение питающей трехфазной сети U_c . Частота $f=50$ Гц. Параметры диодов приведены в приложении 1 методички.

- Нарисовать схему выпрямителя и показать на ней заданные и расчетные токи и напряжения.
- Выбрать тип диода.
- Определить расчетную мощность трансформатора и его коэффициент трансформации.

Построить графики зависимости от времени:

- фазных напряжений вторичной обмотки трансформатора $U_a(t)$, $U_b(t)$ и $U_c(t)$;
- напряжения на нагрузке $U_n(t)$;
- тока, протекающего через диод $i_d(t)$;

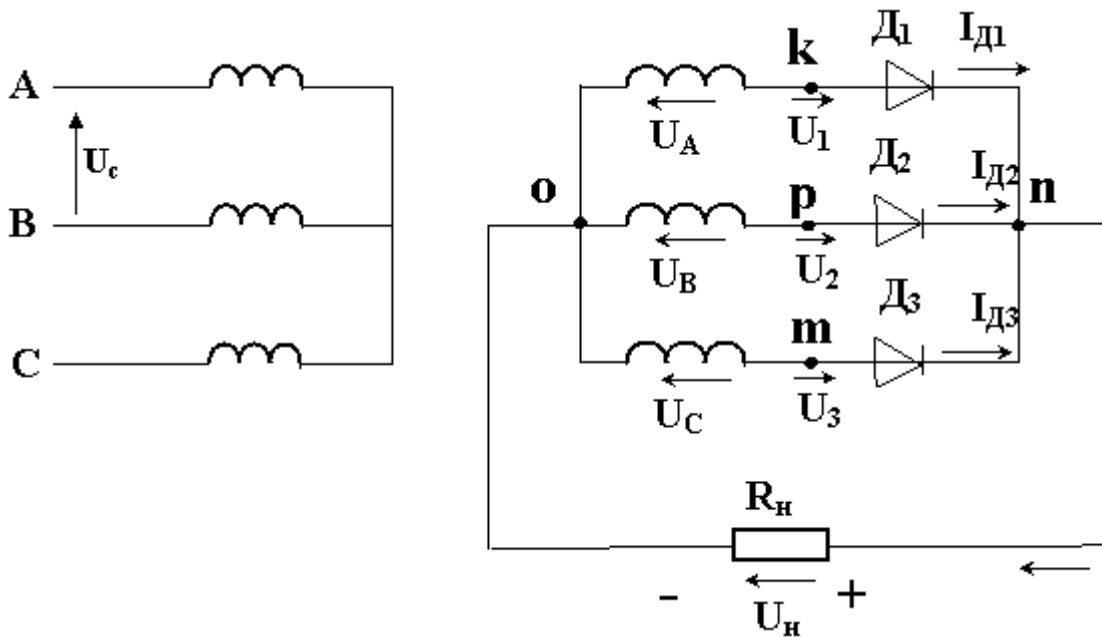
- обратного напряжения $U_{обр}(t)$ на диоде, включенном в фазу вторичной обмотки трансформатора, указанную для вашего варианта в таблице 4.

По осям координат нужно везде указать масштабы и размерности изображаемых величин.

Исходные данные:

$U_c = 380$ В, $I_{но} = 80$ А, $U_{но} = 230$ В, Фаза вторичной обмотки – А.

Решение



Определим максимальное значение выпрямленного тока, проходящего через диод:

$$i_{дm} = 1,21 I_{но} = 1,21 \cdot 80 = 96,8(A)$$

- Определим амплитудное значение фазного напряжения вторичной обмотки трансформатора:

$$U_{2m} = 1,21 U_{но} = 1,21 \cdot 230 = 278,3(B)$$

- Определим максимальное значение обратного напряжения на диоде:

$$U_{обр,m} = \sqrt{3} \times U_{2m} = 1,73 \cdot 278,3 = 481,5(B)$$

- Выберем диоды для трехфазного выпрямителя, исходя из условий:

$$I_{\text{дон}} \geq i_{\text{дм}} \quad I_{\text{дон}} \geq 96,8(A)$$

$$U_{\text{обр}} \geq U_{\text{обр.т}} \quad U_{\text{обр}} \geq 481,5(B)$$

В связи с тем, что выпрямленный ток должен быть очень большим

$$i_{\text{дм}} = 96,8(A)$$

() в каждую фазу выпрямителя необходимо включить параллельно как минимум 20 диодов типа КД202М с прямым током 5 А, и обратным напряжением 500 В.

- Определим коэффициент трансформации трансформатора:

$$K = (U_c / \sqrt{3}) / (0,855 U_{\text{но}}) = 0,675 U_c / U_{\text{но}} = \frac{0,675 \cdot 380}{230} = 1,11$$

- Определим мощность трансформатора:

$$P = 1,37 \times U_{\text{но}} \times I_{\text{но}} = 1,37 \cdot 230 \cdot 80 = 25,2(\text{кВА})$$

- Построим графики зависимости от времени:

- а) фазных напряжений вторичной обмотки трансформатора,
- б) напряжения на нагрузке,
- в) прямого тока, протекающего через диод в фазе А,
- г) обратного напряжения на диоде в фазе А.

9. Расчет характеристик трехфазного трансформатора

Даны паспортные данные трехфазного трансформатора: номинальная мощность S_N , номинальное напряжение U_{1N}/U_{2N} , потери холостого хода и короткого замыкания P_X и P_K . Схема соединений обмоток трансформатора «звезда/звезда». Определить номинальные токи трансформатора и КПД трансформатора при нагрузках 50, 100, 125 % от номинальной. Коэффициент мощности нагрузки $\cos\varphi = 0,8$.

Паспортные данные трансформатора:

$$S_N = 63 \text{ кВА}, \quad U_{1N}/U_{2N} = 6/0,4 \text{ кВ}, \quad P_X = 220 \text{ Вт}, \quad P_K = 1300 \text{ Вт}.$$

Решение

1. Номинальные токи первичной и вторичной обмоток определим из формулы номинальной мощности трансформатора:

$$S_N = \sqrt{3} U_{2N} I_{2N} = \sqrt{3} U_{1N} I_{1N}$$

При мощности трансформатора 50 % от номинальной:

$$I_{1N} = \frac{S_N \cdot \beta}{\sqrt{3} \cdot U_{1N}} = \frac{63 \cdot 10^3 \cdot 0,5}{1,73 \cdot 6 \cdot 10^3} = 3,03(A)$$

$$I_{2N} = \frac{S_N \cdot \beta}{\sqrt{3} \cdot U_{2N}} = \frac{63 \cdot 10^3 \cdot 0,5}{1,73 \cdot 0,4 \cdot 10^3} = 45,5(A)$$

При номинальной мощности (100 %):

$$I_{1N} = \frac{S_N \cdot \beta}{\sqrt{3} \cdot U_{1N}} = \frac{63 \cdot 10^3 \cdot 1}{1,73 \cdot 6 \cdot 10^3} = 6,07(A)$$

$$I_{2N} = \frac{S_N \cdot \beta}{\sqrt{3} \cdot U_{2N}} = \frac{63 \cdot 10^3 \cdot 1}{1,73 \cdot 0,4 \cdot 10^3} = 91,04(A)$$

При мощности 125 % от номинальной:

$$I_{1N} = \frac{S_N \cdot \beta}{\sqrt{3} \cdot U_{1N}} = \frac{63 \cdot 10^3 \cdot 1,25}{1,73 \cdot 6 \cdot 10^3} = 7,59(A)$$

$$I_{2N} = \frac{S_N \cdot \beta}{\sqrt{3} \cdot U_{2N}} = \frac{63 \cdot 10^3 \cdot 1,25}{1,73 \cdot 0,4 \cdot 10^3} = 113,8(A)$$

2. Определим КПД трансформатора:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\beta \times S_N \cos \varphi_2 \times 100\%}{\beta \times S_N \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_K} = \left(1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_{K3}}{\beta S_N \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_K} \right) 100\%$$

При мощности трансформатора 50 % от номинальной:

$$\eta = \left(1 - \frac{P_X + \beta^2 P_K}{\beta S_N \cos \varphi + P_X + \beta^2 P_K} \right) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{220 + 0,5^2 \cdot 1300}{0,5 \cdot 63 \cdot 10^3 \cdot 0,8 + 220 + 0,5^2 \cdot 1300} \right) \cdot 100\% = 97,9\%$$

При номинальной мощности (100 %):

$$\eta = \left(1 - \frac{P_X + \beta^2 P_K}{\beta S_N \cos \varphi + P_X + \beta^2 P_K} \right) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{220 + 1^2 \cdot 1300}{1 \cdot 63 \cdot 10^3 \cdot 0,8 + 220 + 1^2 \cdot 1300} \right) \cdot 100\% = 97\%$$

П
р
и

м
о
щ
н
о
с
т
и

1
2
5